

# Дослідження та методи аналізу

УДК 621.643

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ЗА КІНЕТИЧНИМИ КРИВИМИ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРОДНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

*Є.І.Крижанівський, Л.Я.Побережний**ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42264,  
e-mail: rector@ifdtung.if.ua*

*Предложено оригинальный метод оценки деградации трубных сталей по представленным в объединенном виде кинетическим кривым деформации и электродного потенциала. Установлено, что при статическом и низкочастотном нагружении электродный потенциал не коррелирует с упруго-пластическими деформациями. Показано, что быстротечные процессы на начальных стадиях коррозионной усталости хорошо прослеживаются по кинетическим кривым деформации, а процесс накопления и развития повреждений, когда происходит стабилизация деформации или незначительное ее изменение, лучше интерпретировать по кинетическим кривым электродного потенциала.*

*It is offered original method of the estimation of corrosion degradation of pipeline steel, based on analysis of the kinetic curves of deformation and electrode potential, which presented in united type. It is determined that under static and low frequency loading electrode potential has no correlation with elastoplastic deformation. It is shown that high speed processes on initial stages of corrosion fatigue are well tracked on deformation kinetic curves, and process of the accumulation and developments of the damages, when occurs the stabilization to deformation or small its change, better interpret on kinetic curves of electrode potential.*

Проблема експлуатаційної надійності морських трубопроводів тісно пов'язана з деградацією трубних сталей, викликаною, головним чином, одночасним впливом низькочастотного навантаження та корозійного середовища.

Останнім часом розроблено ряд методів оцінки деградації конструкційних матеріалів та їх довговічності в агресивному середовищі під тривалим статичним навантаженням [1]. Запропоновано імовірнісні моделі оцінки надійності трубопроводів, підданих корозії [2]. Робляться спроби прогнозування таких небезпечних видів корозійно-механічного руйнування трубопроводів, як корозійна втома та корозійне розтріскування [3]. Показано, що існують істотні розбіжності між характеристиками опірності руйнуванню металу конструкції трубопроводу, отриманими на зразках-свідках із матеріалу труб у вихідному стані та після деякого терміну експлуатації [4].

Проте розглянутий аспект проблеми залишається далеко не вирішеним, зокрема, в плані прогнозування терміну безпечної експлуатації трубопроводу, оперативного контролю його корозійно-втомної міцності, визначення залишкового ресурсу з експлуатаційними пошкодженнями та потенційно небезпечного періоду,

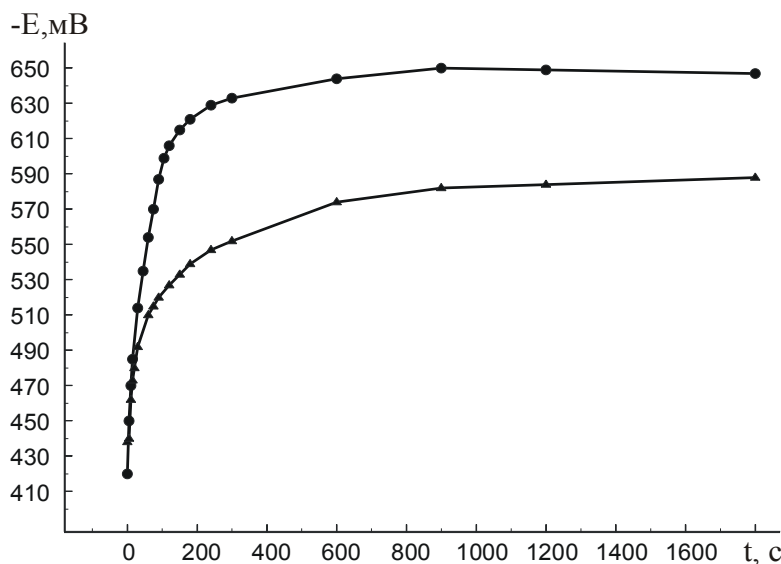
протягом якого існує можливість його аварійного руйнування.

Великий обсяг інформації про низькочастотну корозійну втому сталі трубопроводу дають кінетичні криві електродного потенціалу, отримані в ході випробовувань паралельно з кінетичними кривими деформації [5].

Електродний потенціал (ЕП) є надзвичайно важливою характеристикою матеріалу, оскільки його величина впливає на характер та швидкість проходження катодних і анодних процесів, а також термодинамічну можливість чи неможливість їх протікання в даних умовах. Дослідження кінетики ЕП в умовах, близьких до експлуатаційних, мають важливе практичне значення, бо без них неможлива правильна хімічна інтерпретація корозійних процесів.

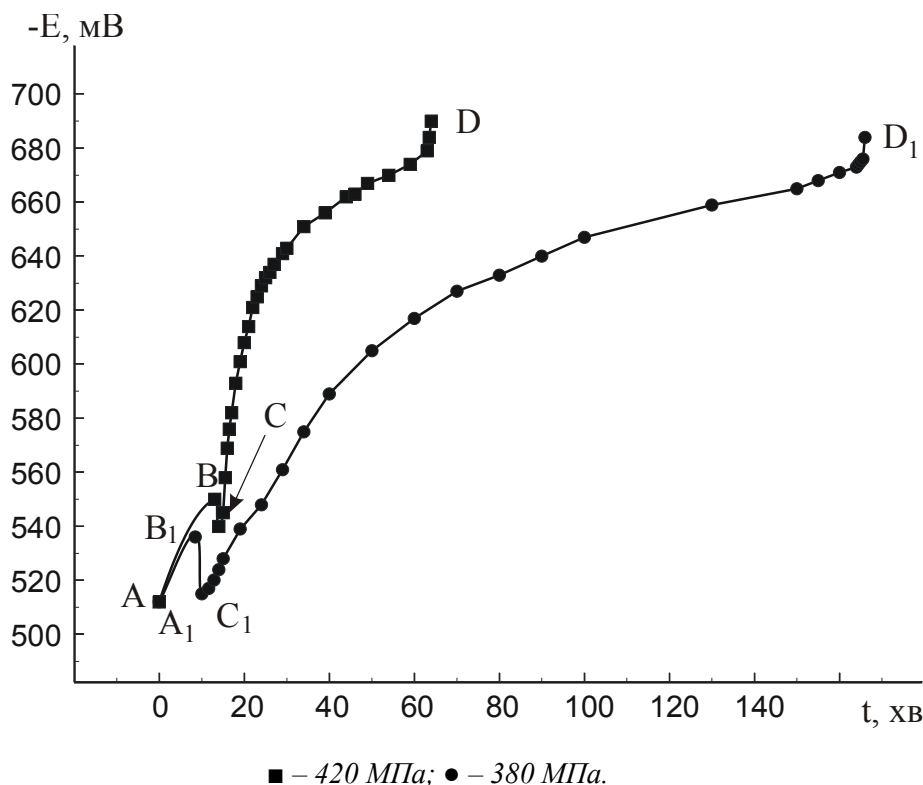
Мета роботи – оцінка деградації сталі трубопроводу при низькочастотному навантаженні в корозійному середовищі за кінетичними кривими деформації та ЕП.

Для досліджень використовували циліндричні зразки-моделі з  $l_p/d = 10$ , виготовлені із заготовок, вирізаних зі стінки труби. Матеріал труби – сталь 20 (ГОСТ 1050-88). Корозійно-втомні випробовування у середовищі морської води при 293 К з частотою навантаження 0,8 Гц



● – полірування та витримка 1 хв; ▲ – полірування та витримка в ексикаторі 24 год.

Рисунок 1 – Залежність кінетики ЕП ненавантаженого зразка-моделі від часу витримки після механічної обробки поверхні (текстурована сталь 20,  $T = 293\text{ K}$ )



■ – 420 МПа; ● – 380 МПа.

Рисунок 2 – Кінетика ЕП текстурованої сталі 20 у морській воді при малоциклового навантаженні

проводили на комп'ютеризованій універсальній установці МВ-1К [6]. В процесі експерименту за допомогою ЕОМ здійснювали неперервну реєстрацію параметрів, за якими визначали деформацію зразка-моделі та величину ЕП. Для вимірювання ЕП використовували хлорсрібний електрод порівняння.

На величину ЕП та характер його зміни впливають різноманітні чинники. Насамперед

це рельєф та хімічна чистота поверхні, на якій проходять основні електрохімічні процеси. Механообробка значно активізує поверхню сталі, що сприяє швидкому розблагородженню (зменшенню ЕП) (рис. 1). Різниця досить значна і становить 50...60 мВ. Тому з метою нівелювання впливу даного чинника на результати експерименту усі дослідні зразки-моделі витримувалися в ексикаторі протягом 24 год.



Рисунок 3 – Зруйнований зразок, покритий продуктами корозії ( $\sigma_a = 310$  МПа,  $N = 25732$  цикли)

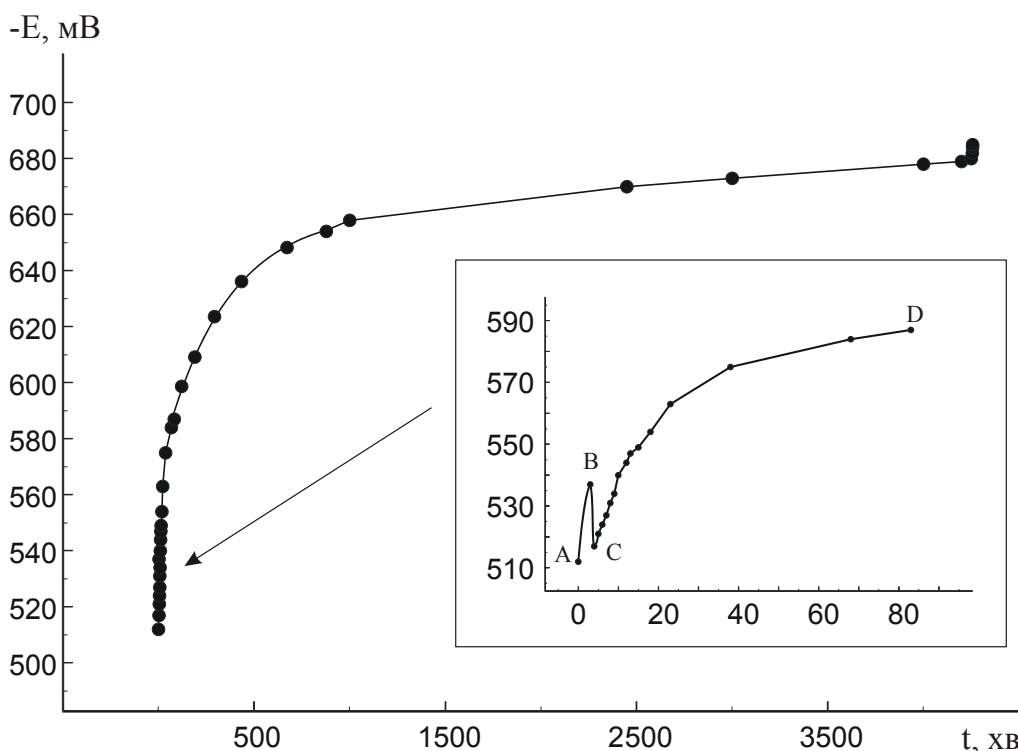


Рисунок 4 – Кінетика ЕП текстурованої сталі 20 у морській воді при багатоцикловому навантаженні (180 МПа)

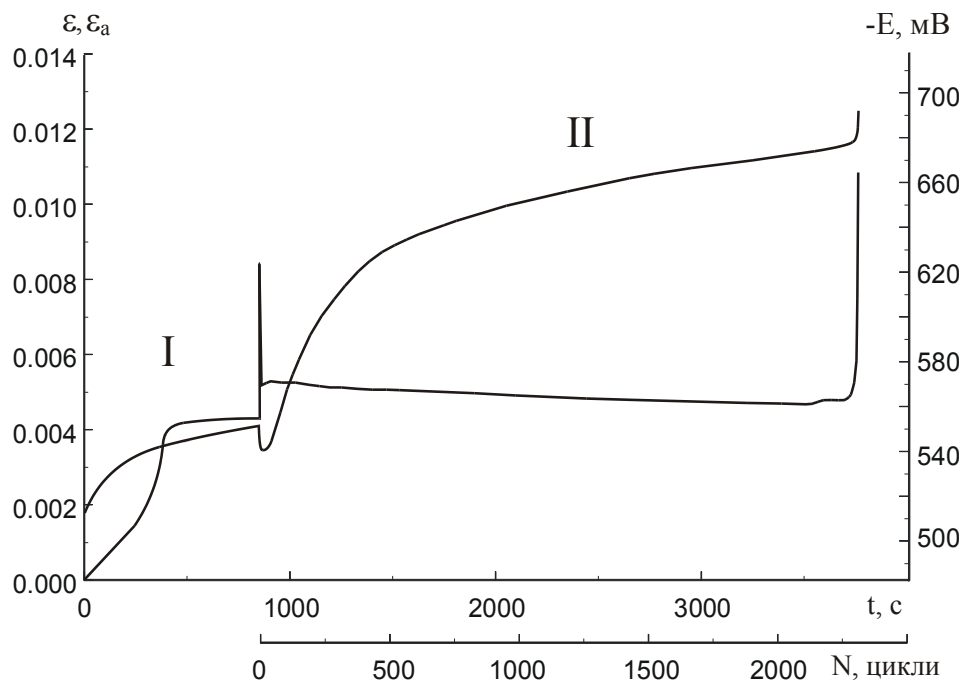
Кінетика ЕП в процесі статичного та наступного низькочастотного малоциклового навантаження зображена на рис. 2.

На ділянках АВ та  $A_1B_1$ , що відповідають ступінчастому статичному навантаженню, відбувається монотонне спадання ЕП тим більше, чим більша величина  $\sigma_a$ . Взаємне розташування цих ділянок, а також їх порівняння з відповідною ділянкою ненавантаженого зразка (рис. 1), свідчить про більшу залежність зміни ЕП від часового фактора, ніж від напружень.

Протягом перших циклів навантаження проходить стрімке зростання ЕП відповідно на 10 мВ на ділянці ВС при  $\sigma_a = 420$  МПа та 20 мВ на ділянці  $B_1C_1$  при  $\sigma_a = 380$  МПа, що може мати таке пояснення.

В процесі низькочастотного обертання навантаженого зразка у морській воді виникають потоки, які змивають з його поверхні частину

адсорбованих агресивних йонів розчинних солей, що полегшує процес десорбції та утруднює повторну первинну та вторинну адсорбцію. Це призводить до сповільнення електродних процесів та зростання ЕП. З іншого боку, з перших циклів навантаження відбувається інтенсивне циклічне знеміцнення, яке супроводжується макроскопічною пластичною деформацією (течінням) та активацією поверхні за рахунок утворення екструзій та інтрузій, що являють собою ювенільні поверхні з набагато нижчим ЕП. В місцях дефектів проходить утворення субмікротріщин, які відіграють роль гальванічних елементів (ГЕ), активізуючи при цьому електродні процеси [7]. Активація поверхні, викликана циклічним навантаженням, швидко компенсує дію потоків середовища, і зростання ЕП припиняється.



**Рисунок 5 – Оцінка деградації текстурованої сталі трубопроводу за кінетичними кривими деформації та ЕП при статичному (I) та низькочастотному (II) навантаженні у морській воді (420 МПа)**

При подальшому накопиченні пошкоджень відбувається спадання ЕП на ділянках CD та  $C_1D_1$  (рис. 2). Глибина потенціальної ями при збільшенні  $\sigma_a$  зменшується, оскільки зростання  $\sigma_a$  сприяє швидкому накопиченню пошкоджень. З тієї ж причини спадання ЕП на ділянці CD при 420 МПа відбувається швидше, ніж на ділянці  $C_1D_1$  при 380 МПа. Воно носить затухаючий характер, оскільки процес накопичення пошкоджень змінюється процесом збільшення та поглиблення вже існуючих дефектів. Крім того, зразок поступово вкривається плівкою продуктів корозії (рис. 3), що сприяє пасивації поверхні та локалізації електродних процесів у місцях дефектів. Однак повної стабілізації, як у випадку ненавантаженого зразка (рис. 1), не спостерігається через те, що в області високих  $\sigma_a$  значні деформації призводять до відшарування продуктів корозії і відповідно депасивації.

Наприкінці ділянки CD починається швидке спадання ЕП, пов'язане з поширенням магистральної тріщини, під час якого проходить утворення значної за площею ювенільної поверхні; на стадії долому стрибок ЕП становить 10-20 мВ.

В області низькочастотної багатоциклової корозійної втоми кінетика ЕП (рис. 4) загалом подібна до розглянутої (рис. 2).

Як і очікувалося, глибина потенціальної ями збільшується і при  $\sigma_a = 180$  МПа становить ~ 30 мВ. Швидкість спадання ЕП на ділянці CD при зниженні  $\sigma_a$  зменшується, оскільки при цьому сповільнюється процес накопичення та розвитку пошкоджень.

Затухання ЕП характеризується виходом на майже лінійну ділянку, що відповідає пасивації поверхні нерозчинними продуктами коро-

зії. Відбувається практично повна локалізація електродних процесів в місцях дефектів з утворенням корозійних пітів та відповідних первинних і вторинних ГЕ. Паралельно розвивається декілька корозійно-втомних тріщин, причому їх ріст досить повільний, на що вказує частково запасивована продуктами корозії поверхня зламу. Підтвердженням цього служить і менша висота стрибка ЕП на стадії остаточного руйнування, оскільки площа свіжоутвореної поверхні відносно мала.

З метою поглибленого аналізу взаємозв'язку процесів деформації та руйнування і впливу на них корозійно-активного середовища пропонується кінетичні криві ЕП та деформації представляти спільно (рис. 5).

Встановлено, що при статичному (I) та низькочастотному (II) навантаженні ЕП не корелює з пружно-пластичними деформаціями.

В процесі того, як у статисти під дією зростаючого напруження послідовно відбувається пружна та пружно-пластична деформація, а при фіксованому навантаженні і повзучість, ЕП монотонно зростає з тенденцією до затухання.

При низькочастотному навантаженні потенціальна яма не пов'язана з деформаційним піком, хоча її глибина залежить від  $\sigma_a$ .

Саме відсутність кореляції між кінетикою деформації та ЕП робить необхідним сумісне вивчення цих двох процесів з метою достовірної оцінки деградації трубної сталі. ЕП, з одного боку, є чутливим до дії різноманітних сторонніх чинників, а з іншого, дає змогу спостерігати за процесом накопичення та розвитку пошкоджень, коли відбувається стабілізація деформації або незначна її зміна (рис. 5).

Як показали дослідження (рис. 2, 4), ЕП початку руйнування практично не залежить від  $\sigma_a$ , що дає підстави прогнозувати залишкову довговічність у корозійному середовищі за кінетичними кривими ЕП.

Швидкоплинні процеси на початкових стадіях корозійної втоми, добре простежувані за кінетичними кривими деформації, кінетика ЕП ілюструє не найкраще, через інерційність цього параметра.

Таким чином, можна зробити узагальнюючі висновки.

1. Поведінка сталі трубопроводу при статичному та низькочастотному навантаженні в корозійному середовищі розкривається за допомогою кривих  $\epsilon(\sigma_a) - t(N)$ ,  $-E - t(N)$  під різним кутом зору, що особливо важливо для розвитку теорії низькочастотної корозійної втоми.

2. Розглянуті явища вказують на недостатність класичних методів розрахунку на міцність несучих елементів конструкцій морських трубопроводів за пружним чи пластичним станом та на необхідність їх доповнення новими методами, які враховують деградацію трубних сталей.

### Література

1. Скрипник І. Д. Розробка методів оцінки деградації конструкційних матеріалів та їх довговічності в агресивному середовищі під тривалим статичним навантаженням: Автореф. дис. докт. техн. наук: 01.02.04 / НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. – Львів, 2000. – 39 с.

дартні статичні характеристики відцентрових нагнітачів природного газу. Такі характеристики не забезпечують вирішення питання оптимізації.

2. Orisamoly J. R., Liu Q., Chernuka M. W. Probabilistic residual strength assessment of corroded pipelines // Proc. 5th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., The Hague, June 11-16, 1995. Vol. 4. – Colden (Colo), 1995. – P. 221-228

3. Гареев А.Г. Прогнозирование времени до разрушения магистральных трубопроводов в условиях коррозионно-механических воздействий // Соврем. пробл. бур. и нефтепромысл. мех. / Уфим. гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа, 1996. – С. 171-174

4. Зорин Е.Е., Ланчаков Г.А., Степаненко А.И., Шибнев А.В. Работоспособность трубопроводов. – М.: Недра; М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 244 с.

5. Побережний Л.Я. Закономірності деформації і руйнування морських трубопроводів при статичному та низькочастотному навантаженні: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.13 / Івано-Франківський національний техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2002. – 19 с.

6. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я., Ровінський В.А. Удосконалена автоматизована випробувальна система з ЕОМ для дослідження корозійно-механічного руйнування // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 1(12). – С. 292-294.

7. Петров Л.М. Фізико-хімічні аспекти механіки корозійного руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 3. – С. 127-129.

УДК 622.691

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОМПРОМУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

<sup>1</sup>М.І.Горбійчук, <sup>1</sup>М.І.Козутяк, <sup>2</sup>Є.О.Ковалів

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42331, e-mail: public@ifdtung.if.ua

<sup>2</sup>УМГ "Прикарпаттрансгаз", 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Незалежності, 48, тел. (03422) 22386, 25451, факс (0342) 559088

*Разработана методика построения математической модели процесса компримирования природного газа, базирующаяся на данных журнала диспетчера. Методика опробована на примере Богородчанского ЛУМГ.*

*The method of application of constructing of mathematical model of the process of contraction of gas distillate basing on data's of a journal of the manager is designed. The method of application is tested on an example Bogorochanu's linear management of gas mains.*

Оптимізація процесу компримування природного газу забезпечує до 2% економії енергетичних ресурсів. Вирішити проблему оптимізації можна лише в тому випадку, коли відомі математичні моделі роботи компресорних станцій (КС). Як правило, для оптимізації технологічного режиму КС використовують [1] стан-

зації в повному обсязі. По-перше, за допомогою таких характеристик неможливо сформувати вартісні показники роботи КС, а по-друге, ввести обмеження на технологічні параметри. Крім того, спостерігається значне відхилення (до 17% [2]) стандартних характеристик від реальних.